

EUROPEAN PATENT OFFICE

Patent Abstracts of Japan

PUBLICATION NUMBER : 01287528
PUBLICATION DATE : 20-11-89

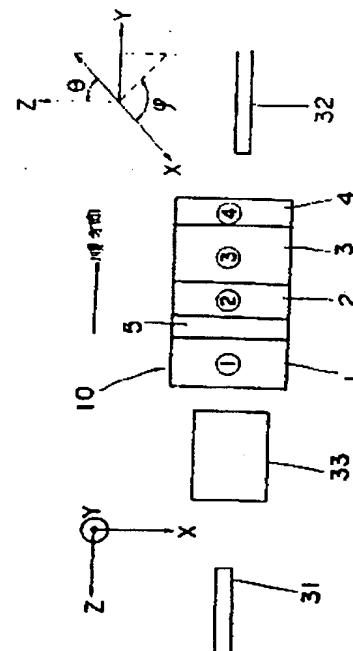
APPLICATION DATE : 13-05-88
APPLICATION NUMBER : 63118017

APPLICANT : TDK CORP;

INVENTOR : IWATSUKA SHINJI;

INT.CL. : G02B 27/28

TITLE : OPTICAL ISOLATOR AND OPTICAL CIRCULATOR



ABSTRACT : PURPOSE: To eliminate polarization dependency and to decrease a coupling loss by setting the thickness of each birefringent crystal and the direction of an optical axis so that polarized components that forward light which travels from one optical waveguide to the other optical waveguide contains are equal in passing length.

CONSTITUTION: The thickness of respective birefringent crystal 1 to 4 and the directions of their optical axes are set so that the different polarized light components contained in the forward light traveling from one optical waveguide 31 to the other optical waveguide 32 are equal in passing length. Namely, the thickness of at least four parallel plane plate 1 to 4 of birefringent crystal and the directions of the optical axes are set that the different polarized light components of the forward light are equal in passing length. The different polarized components of the forward direction traveling from one optical waveguide 31 to the other optical waveguide 32 are made incident on the other optical waveguide 32 at the same position. Consequently, the coupling loss becomes small. Further, this optical isolator uses the parallel plane plates 1 to 4 of birefringent crystal, so the manufacture cost is reduced.

COPYRIGHT: (C)1989,JPO&Japio

⑯ 日本国特許庁 (JP)

⑪ 特許出願公開

⑫ 公開特許公報 (A) 平1-287528

⑬ Int. Cl. 4
G 02 B 27/28

識別記号

厅内整理番号
8106-2H

⑭ 公開 平成1年(1989)11月20日

審査請求 未請求 請求項の数 2 (全9頁)

⑮ 発明の名称 光アイソレータ及び光サーチュレータ

⑯ 特 願 昭63-118017

⑰ 出 願 昭63(1988)5月13日

⑱ 発明者 岩塚 信治 東京都中央区日本橋1丁目13番1号 テイーディーケイ株式会社内

⑲ 出願人 テイーディーケイ株式会社 東京都中央区日本橋1丁目13番1号

⑳ 代理人 弁理士 三澤 正義

明細書

1. 発明の名称

光アイソレータ及び光サーチュレータ

2. 特許請求の範囲

(1) 対向する2つの光導波路の間に、少なくとも4枚の平行平板の複屈折結晶と、少なくとも1枚の45°ファラデー回転子と、少なくとも1個のレンズを有する光アイソレータにおいて、一方の光導波路から他方の光導波路に向う順方向の光に含まれる異なる偏光成分の通過長が等しくなるように、前記各複屈折結晶の厚さ及び光学軸の方向を設定したことを特徴とする光アイソレータ。

(2) 一方の側に並設配置の第1、第3の2本の光導波路を、他方の側に第2の光導波路を相対向する状態に設け、相対向状態の光導波路の間に少なくとも4枚の平行平板の複屈折結晶と、少なくとも1枚の45°ファラデー回転子と、少なくとも1個のレンズを有する光サーチュレータにおいて、第2の光導波路から第3の光導波路に向う光に含まれる異なる偏光成分の通過長が等しくなるよう

に前記各複屈折結晶の厚さ及び光学軸の方向を設定したことを特徴とする光サーチュレータ。

3. 発明の詳細な説明

[発明の目的]

(産業上の利用分野)

本発明は、光計測システムや光通信システムに用いられる偏波依存性のない光アイソレータ及び光サーチュレータに関する。

(従来の技術)

一般に、厚さdで、光学軸(c軸)が光の透過方向に対し $\theta = 45^\circ$ 程度となるように形成した平行平板状の複屈折結晶においては、光が結晶に対し垂直に入射すると第9図に示すように紙面に垂直方向の偏光成分(常光)は何等屈折を受けずにこの複屈折結晶40を透過するが、紙面方向の偏光成分(異常光)は複屈折結晶40に入射すると同図に示すように屈折し、分離距離aだけ離れた位置を前記常光と平行となって出射していく。

そして、ルチルや方解石等の複屈折結晶では、分離距離aは下記(1)式で表わすことができる。

特開平1-287528(2)

$$|a| = \kappa \times |d| \quad \dots (1)$$

例えば波長 $1.3\mu\text{m}$, $\theta = 45^\circ$ のとき、ルチル、方解石とも k の値は約 0.1 である。

ところで、非相反性光学装置の一種である光アイソレータにおいては、従来、光の順方向に対し特定の偏光成分しか透過させず、残余の光成分は捨てられているため、光が有効に用いられないという問題があった。このため、従来においても、光のあらゆる偏光成分を透過させるようにした光アイソレータが提案されている。このような光アイソレータの従来例(特公昭58-28561号)を第10図乃至第12図を参照じて説明する。

第10図に示す光アイソレータ本体50は、第1の光導波路である第1の光ファイバ31と、第2の光導波路である第2の光ファイバ32との間に配置されている。また、この光アイソレータ本体50と第1の光ファイバ31との間に、集光用のレンズ33が配置されている。

ここに、角度 ϕ はC軸のX-Y平面への投影角である。また、複屈折結晶51, 52, 53の厚さは、頭に示すd, dに設定している。

このように構成した光アイソレータ本体5.0において、顕方向におけるX-Y平面内の偏光ビームの中心位置の関係を第11図(a)に示す。

第11図:(a) 及び第1表から明らかなように、第1の光ファイバ31における偏光角度 $\psi = 0^\circ$ の光は、複屈折結晶51を異常光として、かつ常光に対し $\sqrt{2}a$ の分離距離をもって通過し、45°ファラデー回転子54により 45° 偏波面が回転した後、複屈折結晶52を異常光として、かつ a の分離距離をもって通過し、さらに、複屈折結晶53を常光として通過して第2の光ファイバ32に入射する。

また、第1の光ファイバ3-1における偏光角度 $\psi = 90^\circ$ の光は、複屈折結晶5-1を常光として通過した後4-5-1ファラデー回転子5-4で4-5-1偏波面が回転し、さらに複屈折結晶5-2を常光として通過し、複屈折結晶5-3を異常光として、か

前記光アイソレータ本体50は、符号①、②、③を付して示す3枚の平行平板状の複屈折結晶51、52、53と、複屈折結晶51、52間に接合配置された45°ファラデー回転子54とを具備している。

ここで、光アイソレータ本体 50 に対する X、Y、Z の直交 3 軸を第 1・0 図に示すように設定すると共に、光の進行方向の順方向を第 1・0 図に示すように -Z 方向と定義し、さらに、各複屈折結晶 51、52、53 の光学軸 (C 軸) の立体的な角度を同図に示すように定義したときの、偏光角度 $\psi = 0^\circ$ の光と、偏光角度 $\psi = 90^\circ$ の光の光アイソレータ本体 50 の透過状態を第 1 表に示す。

司 1 疾

厚さ	常光と異常 との分離距離	C端の方向		光ファイバ31において 偏光角度 $\phi = 0^\circ$ の光	光ファイバ31において 偏光角度 $\phi = -90^\circ$ の光
		θ	ϕ		
①	$\frac{1}{2}d$	$\frac{1}{2}a$	45°	常光	常光
②	d	a	45°	異常光	常光
③	d	a	45°	常光	異常光

(群方向に対して)

つ常光との分離距離 a をもって通過し、第2の光
ファイバ32に入射する。

この結果、偏光角度 $\psi = 0^\circ$ の光と、 $\psi = 90^\circ$ の光とはこの光アイソレータ本体 50 において一旦分離されるが最終的に第 2 の光ファイバ 53 の同じ位置に入射することになる。

一方、光アイソレータ本体 50 に対する光の逆方向の透過状態に着目すると、第 11 図 (b) に示すように、第 2 の光ファイバ 32 から出射した偏光角度 $\phi = 45^\circ$ の光は複屈折結晶 53 を常光として通過した後複屈折結晶 52 を異常光として、かつ常光からの分離距離 a をもって通過し、45° フララー回転子 54 により偏波面が 45° 回転し、複屈折結晶 51 を常光として通過して第 1 の光ファイバ 31 から、X 方向に $+\sqrt{2}a$ 離れた位置に出現する。

また、第2の光ファイバ32から出射した偏光角度 $\psi = 135^\circ$ の光は、複屈折結晶53を異常光として、かつ分離距離 a をもって通過し、複屈折結晶52を常光として通過した後 45° ファラ

データ回転子54により45°偏光面が回転し偏光角度180°=0°となり、さらに、複屈折結晶51を異常光として、かつ分離距離 $\sqrt{2}d$ をもって第1の光ファイバ31から、X方向に一括り離れた位置に出射する。

この結果、逆方向についていはずの光も第1の光ファイバ31に入射しない。

上述したように、第1の光ファイバ31からの光は偏光の有無にかかわらず第2の光ファイバ32に入射する。

しかしながら、第1の光ファイバ31から出射した偏光角度 $\psi=0^\circ$ の光はこの光アイソレータ本体50の複屈折結晶群51、52、53を通過する際、 $(\sqrt{2}d + d)$ の距離を異常光として透過し、dの距離を常光として透過する。

一方、偏光角度 $\psi=90^\circ$ の光は、dの距離を異常光として、 $\sqrt{2}d + d$ の距離を常光として透過する。

この場合に、常光と異常光とでは、複屈折結晶51、52、53の屈折率が異なるので、上述じ

た2つの偏光が光アイソレータ本体50を透過する際実質的な光路長の相違が生じ、第12図に示すようにレンズ33によって集光位置が上述した2つの偏光について異なることになって、このような2つの偏光を第2の光ファイバ32で受光する際に結合損失が生じるという問題がある。

次に、従来の光アイソレータの他例（特公昭61-58809号）を第13図を参照して説明する。

同図に示す光アイソレータ本体60は、ファラデー回転子63の両側にテーパー状の複屈折結晶61、62を配置し、これら複屈折結晶61、62の常光、異常光に対する屈折率の相違を利用して偏光分離を行うようにしたるものである。尚、第13図中、34は集光レンズである。しかし、このような光アイソレータ本体60においては、テーパー状の複屈折結晶61、62が平行平板のものは比べ加工が難しく且つ生産性に欠けるため全体の製造価格が高価となるという問題がある。

（発明が解決しようとする課題）

上述したように、従来の光アイソレータは、

第2の光ファイバーで光を受光する際に結合損失が生じたり、製造価格の高騰を招くという問題がある。

そこで、本発明は低損失で偏波依存性が無く、製造価格の高騰を招くことのない光アイソレータ及び光リーキュレータを提供することを目的とするものである。

【発明の構成】

（課題を解決するための手段）

請求項1記載の発明は、対向する2つの光導波路の間に、少なくとも4枚の平行平板の複屈折結晶と、少なくとも1枚の45°ファラデー回転子と、少なくとも1個のレンズを有する光アイソレータにおいて、一方の光導波路から他方の光導波路に向う順方向の光に含まれる異なる偏光成分の通過長が等しくなるように、前記各複屈折結晶の厚さ及び光学軸の方向を設定したものである。

また、請求項2記載の発明は、一方の側に並設置の第1、第3の2本の光導波路を、他方の側に第2の光導波路を相対向する状態に設け、相対

向状態の光導波路の間に少なくとも4枚の平行平板の複屈折結晶と、少なくとも1枚の45°ファラデー回転子と、少なくとも1個のレンズを有する光サークュレータにおいて、第2の光導波路から第3の光導波路に向う光に含まれる異なる偏光成分の通過長が等しくなるように前記各複屈折結晶の厚さ及び光学軸の方向を設定したものである。

（作用）

以下に上記構成の光アイソレータ及び光サークュレータの作用をそれぞれ説明する。

請求項1記載の光アイソレータによれば、少なくとも4枚の平行平板の複屈折結晶の厚さと光学軸の方向を順方向の光に対して、異なる偏光成分の通過長が等しくなるように設定したことによって、一方の光導波路から他方の光導波路に向う順方向の光における異なる偏光成分が、他方の光導波路の同一の位置に入射することになり結合損失が少なくなる。また、この光アイソレータは平行平板の複屈折結晶を用いているので製造価格も低廉となる。

請求項1記載の光サーキュレータによれば、第2の光導波路から第3の光導波路に向う光に含まれる異なる偏光成分が、少なくとも4枚の平行平板の複屈折結晶を通過する際これらの通過長が等しくなるので、第3の光導波路の同一の位置に入射することになり、上述した光アイソレータの場合と同様、結合損失が少なくなると共に、製造価格も低廉となる。

(実施例)

以下に本発明の実施例を詳細に説明する。

まず、第1図及び第2図(a)、(b)を参照して第1の実施例を説明する。

第1図は本実施例の光アイソレータを示すものであり、第1の光導波路である第1の光ファイバ31と、第2の光導波路である第2の光ファイバ32との間に、非相反光学装置本体10と集光用レンズ33が配置されている。非相反光学装置本体10は符号①、②、③、④を付して示す4枚の複屈折結晶1、2、3、4と、複屈折結晶1、2間に接合配置された45°ファラデー回転子5と

$\sqrt{2}d$ に設定している。この非相反光学装置本体10において、順方向におけるX、Y平面上の偏光ビームの中心位置の関係を第2図(a)に示す。

第2図(a)及び第2表から明らかのように、第1の光ファイバ31からの偏光角度 $\psi = 0^\circ$ の光は、複屈折結晶1を異常光として、かつ常光に對し $\sqrt{2}a$ の分離距離をもって通過し、45°ファラデー回転子5により45°偏波面が回転した後、複屈折結晶2を異常光として、かつ a の分離距離をもって通過し、さらに、複屈折結晶3、4を常光として通過し第2の光ファイバ32に入射する。

また、第1の光ファイバ31からの偏光角度 $\psi = 90^\circ$ の光は、複屈折結晶1を常光として通過し、45°ファラデー回転子5で45°偏波面が回転した後複屈折結晶2を常光として通過する。さらに、この常光は複屈折結晶3に至り、ここを異常光として、かつ $(1 + \sqrt{2}/2)a$ の分離距離をもって通過し、さらに、複屈折結晶4で異常光として、かつ $\sqrt{2}a$ の分離距離をもって通過し第2

を具備している。

この非相反光学装置本体10に対するX、Y、Zの直交3軸、C軸及び偏光角度 ψ は第10図に示すものと同一とし、かつ光の順方向、逆方向も第10図に示すものと同一として以下の説明を行う。

この場合の $\psi = 0^\circ$ の光、 $\psi = 90^\circ$ の光の非相反光学装置本体10に対する透過状態を第2表に示す。

第2表

厚さ	常光と異常光の分離距離	C軸の方向	光ファイバ1において		光ファイバ2において
			θ	ψ	
①	$\sqrt{2}d$	$\sqrt{2}a$	45°	0°	異常光
②	d	a	45°	225°	異常光
③	$(1 + \sqrt{2}/2)d$	$(1 + \sqrt{2}/2)a$	45°	315°	常光
④	$\sqrt{2}d$	$\sqrt{2}a$	45°	135°	常光

(順方向に對して)

第2表に示すように各複屈折結晶1、2、3、

4の厚さは、順に $\sqrt{2}d$ 、 d 、 $(1 + \sqrt{2}/2)d$ 、

の光ファイバ32に入射する。

この結果、 $\psi = 0^\circ$ の光と、 $\psi = 90^\circ$ の光とは、この非相反光学装置本体10において、いずれも異常光としての通過長と常光としての通過長とが $(1 + \sqrt{2})a$ になり、第2の光ファイバ32での両光の集光位置が同一となり、結合損失が少なくなる。

一方、非相反光学装置本体10に対する逆方向の光の透過状態は第2図(b)示すようになる。

すなわち、第2の光ファイバ32からの $\psi = 45.5^\circ$ の光は、複屈折結晶3、4を常光として通過した後複屈折結晶2を異常光として、かつ ψ の分離距離をもって通過し、45°ファラデー回転子5により45°偏波面が回転し、複屈折結晶1を常光として通過し、第1の光ファイバ31からX方向に $+\sqrt{2}a$ 離れた位置に出射する。

また、第2の光ファイバ4からの $\psi = 135^\circ$ の光は、複屈折結晶4を異常光として、かつ $\sqrt{2}a$ の分離距離をもって通過し、複屈折結晶3を異常光として、かつ分離距離 $(1 + \sqrt{2}/2)a$ をもって

通過し、さらに、複屈折結晶2を常光として通過し、45° ファラデー回転子5により45° 偏波面が回転した後複屈折結晶1を異常光として、かつ $\sqrt{2}a$ の分離距離をもって通過し、第1の光ファイバ31からX方向に $-\sqrt{2}a$ 離れた位置に出射する。

この結果、第2の光ファイバ32からの上述した両光はいずれも第1の光ファイバ31には入射せず、この非相反光学装置本体10は逆方向の光に対し光アイソレータとしての本来の機能を発揮することになる。

次に、第3図、第4図(a)、(b)を参照して、第2の実施例である光アイソレータを説明する。

第3図に示す非相反光学装置本体10Aの厚さ及び光の透過状態を第3表に、X、Y平面における偏光ビームの関係を第4図(a)、(b)にそれぞれ示す。

(以下余白)

向の光は、いずれも異常光として通過する光路長 $2a$ となって、第2の光ファイバ32の同一の位置に入射する。

また、第2の光ファイバ32からの逆方向の光は、第4図(b)に示す如くなる。すなわち、一方の偏光は4枚の複屈折結晶14、13、12、11を異常光として通過し第1の光ファイバ31に到達せず、また、他方の偏光は分離距離を生じさせない4枚の複屈折結晶14、13、12、11を常光として通過する。

この非相反光学装置本体10Aによれば、前記非相反光学装置本体10と同等の機能を発揮させることができると共に、45° ファラデー回転子5A、5B 2枚を用いているので、アイソレーション、その温度特性及び波長特性をより向上させることができる。

次に、第5図を参照して、本発明の第3の実施例を説明する。

同図に示す非相反光学装置本体20は、符号①乃至⑦を付して示す7枚の平行平板状の複屈折結晶

第3表

厚さ	常光と異常光 の分離距離	C軸の方向		光ファイバ31において		光ファイバ31において	
		θ	φ	偏光角度 $\phi=0^\circ$ の光	偏光角度 $\phi=90^\circ$ の光	偏光角度 $\phi=0^\circ$ の光	偏光角度 $\phi=90^\circ$ の光
① d	a	45°	0°	異常光	常光	常光	常光
② $(1 + \frac{\sqrt{2}}{2})d$	$(1 + \frac{\sqrt{2}}{2})a$	45°	315°	常光	異常光	常光	異常光
③ $(1 - \frac{\sqrt{2}}{2})d$	$(1 - \frac{\sqrt{2}}{2})a$	45°	135°	常光	異常光	常光	異常光
④ d	a	45°	90°	異常光	常光	常光	常光

尚、この非相反光学装置本体10Aは、4枚の複屈折結晶11、12、13、14(符号①、②、③、④を付して示す。)と、2枚の45° ファラデー回転子5A、5Bとにより構成され、各複屈折結晶11、12、13、14の厚さを順に d 、 $(1 + \sqrt{2}/2)d$ 、 $(1 - \sqrt{2}/2)d$ 、 d に設定している。

この非相反光学装置本体10Aの場合にも、第3表及び第4図(a)から明らかなように光ファイバ1からの $\phi=0^\circ$ の光及び $\phi=90^\circ$ の順方

晶21乃至27と、3枚の45° ファラデー回転子5A、5B、5Cとを接合配置することにより構成したものである。

この非相反光学装置本体20における厚さ及び光の透過状態を第4表に、X、Y平面における偏光ビームの関係を第6図に示す。

第4表

厚さ	常光と異常光 の分離距離	C軸の方向		光ファイバ31において		光ファイバ31において	
		θ	φ	偏光角度 $\phi=0^\circ$ の光	偏光角度 $\phi=90^\circ$ の光	偏光角度 $\phi=0^\circ$ の光	偏光角度 $\phi=90^\circ$ の光
① $\sqrt{2}d$	$\sqrt{2}a$	45°	0°	異常光	常光	常光	常光
② $\sqrt{2}d$	$\sqrt{2}a$	45°	180°	異常光	常光	常光	常光
③ $\frac{\sqrt{2}+1}{2}d$	$\frac{\sqrt{2}+1}{2}a$	45°	135°	常光	異常光	常光	異常光
④ $\frac{\sqrt{2}-1}{2}d$	$\frac{\sqrt{2}-1}{2}a$	45°	315°	常光	異常光	常光	異常光
⑤ $\sqrt{2}d$	$\sqrt{2}a$	45°	90°	異常光	常光	常光	常光
⑥ $\frac{\sqrt{2}+1}{2}d$	$\frac{\sqrt{2}+1}{2}a$	45°	45°	常光	異常光	常光	異常光
⑦ $\frac{\sqrt{2}-1}{2}d$	$\frac{\sqrt{2}-1}{2}a$	45°	225°	常光	異常光	常光	異常光

この非相反光学装置本体20の場合にも、第4表及び第6図から明らかなように、光ファイバ31からの $\phi = 0^\circ$ の光、 $\phi = 90^\circ$ の光の順方向の光は、いずれも異常光として通過する光路長が $2\sqrt{a}$ となり、第2の光ファイバ32の同一の位置に入射する。

また、第2の光ファイバ32からの逆方向の光は、いずれの偏光も第1の光ファイバ31に到達しない。

次に、本発明の応用例を第7図、第8図を参照して説明する。

第7図は非相反光学装置本体10を用い、第2の光ファイバ32の近傍に第3の光ファイバ32Aへを配置した光学系を示すものである。

この光学系において、第3の光ファイバ32Aから出射するある特定の偏光成分が非相反光学装置本体10を経て第1の光ファイバ31に入射するように配置すれば、第3の光ファイバ32A→非相反光学装置本体10→第1の光ファイバ31、第1の光ファイバ31→非相反光学装置本体10

を図ることができる光アイソレータを提供することができる。

請求項2記載の発明によれば、第2の光導波路から第3の光導波路に向う光の偏波依存性がないと共に結合損失が少なく、かつ製造価格の低廉化を図ることができる光サーキュレータを提供することができる。

4. 図面の簡単な説明

第1図は本発明の第1の実施例を示す概略構成図、第2図(a)、(b)はそれぞれ第1図に示す光アイソレータのX、Y平面における各偏光ビームの順方向、逆方向の分離距離を示す説明図、第3図は本発明の第2の実施例を示す概略構成図、第4図(a)、(b)はそれぞれ第3図に示す光アイソレータのX、Y平面における各偏光ビームの順方向、逆方向の分離距離を示す説明図、第5図は本発明の第3の実施例を示す概略構成図、第6図は第5図に示す光アイソレータのX、Y平面における偏光ビームの順方向の分離距離を示す説明図、第7図、第8図はそれぞれ本発明の応用例

→第2の光ファイバ32という光路を形成する光サーキュレータを構成できる。

この場合に、第3の光ファイバ32Aから第1の光ファイバ31への光路は偏波依存性を有するものの、第1の光ファイバ31から第2の光ファイバ32への光路は偏波依存性が無く、これにより、双方向通信や光計測に好適な光サーキュレータを提供できる。

また、第8図に示すように非相反光学装置本体10Aを用いて同様の光学系を構成しても、第7図に示すものと同様な機能を有する光サーキュレータを提供できる。

本発明は上述した実施例に限定されるものではなくその要旨の範囲内で種々の変形が可能である。

【発明の効果】

以上詳述した本発明によれば、以下の効果を奏する。

請求項1記載の発明によれば、一方の光導波路から他方の光導波路に向う光の偏波依存性がないと共に結合損失が少なく、かつ製造価格の低廉化

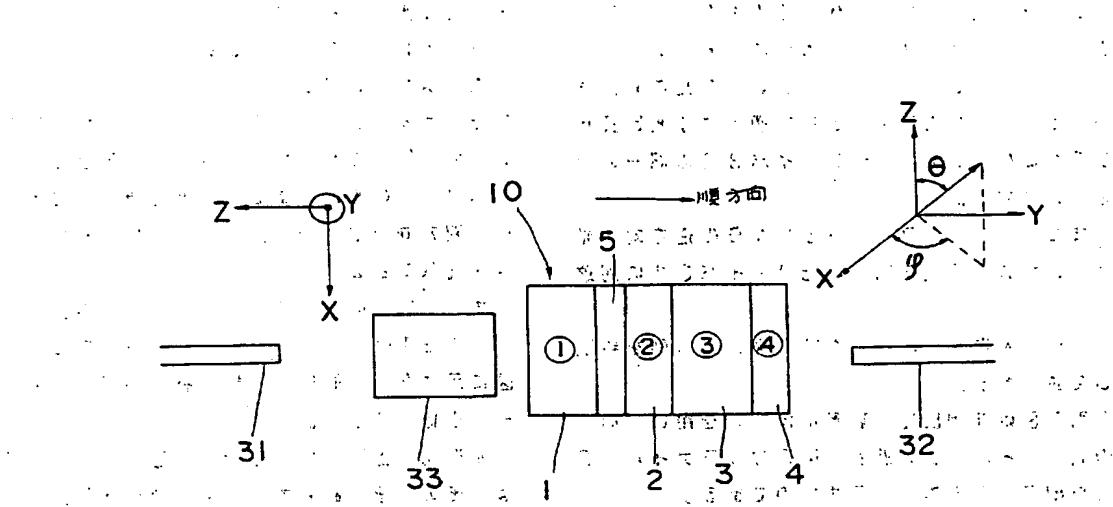
である光サーキュレータを示す概略構成図、第9図は複屈折結晶の偏光分離の原理を示す説明図、第10図は従来の光アイソレータの構成を示す図、第11図(a)、(b)はそれぞれ第10図に示す光アイソレータのX、Y平面における偏光ビームの順方向、逆方向の分離距離を示す説明図、第12図は第10図に示す光学系における集光位置の差を示す説明図、第13図は従来例の他例を示す概略構成図である。

10, 10A, 20…非相反光学装置本体、
1乃至4, 11乃至14…複屈折結晶、
5, 5A, 5B,

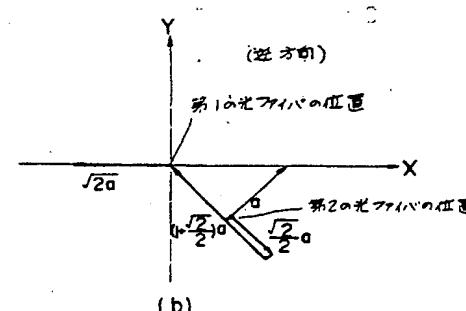
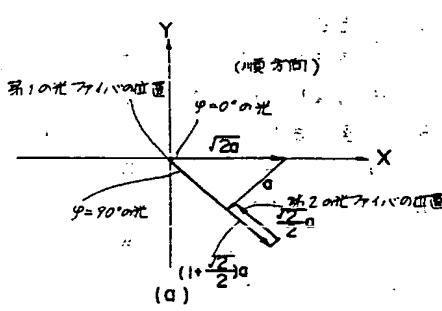
5C…45° フラーティ回転子。

代理人 弁理士 三澤正義

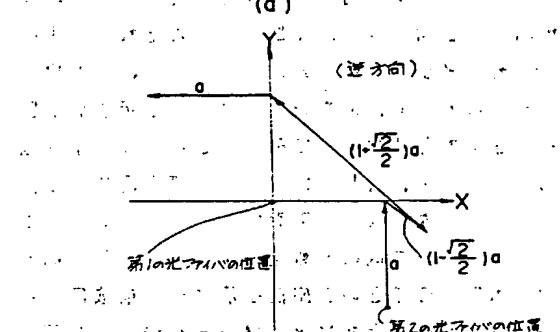
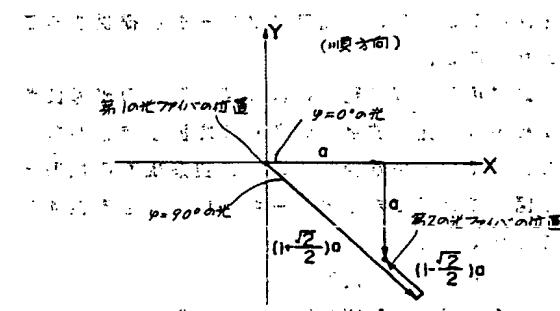




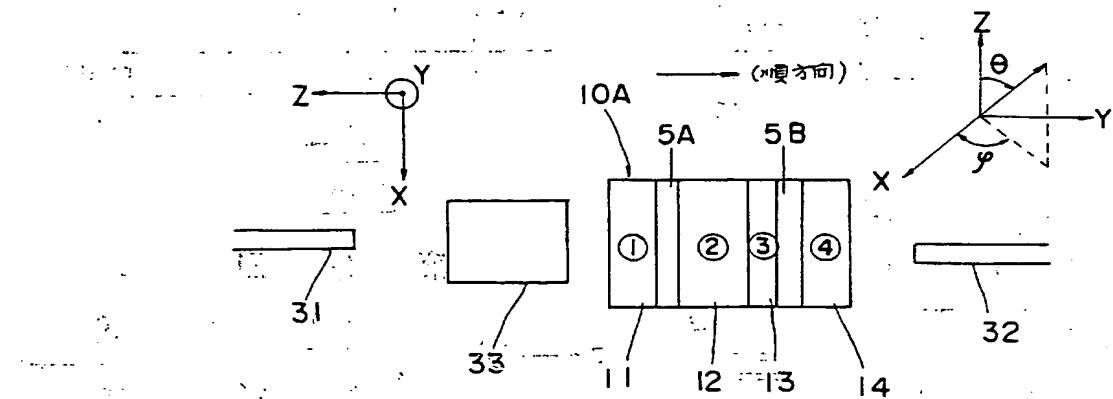
第 1 図



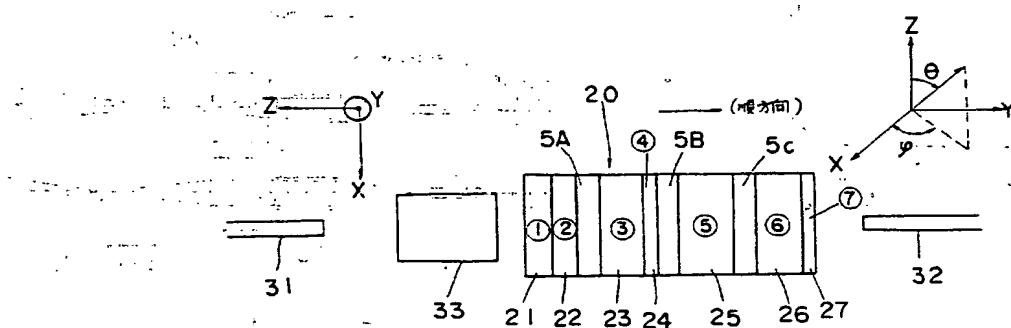
第 2 図



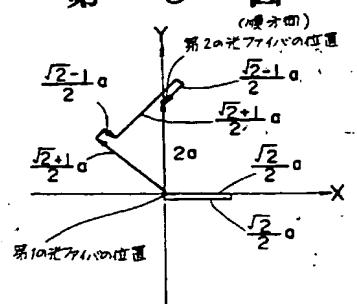
第 4 図

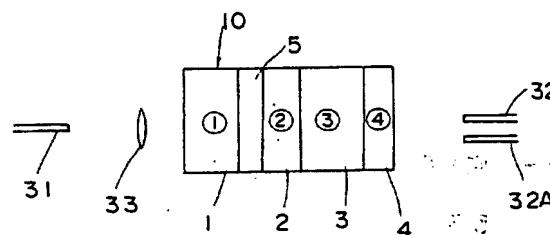


第 3 図

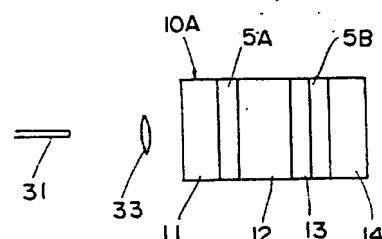


第 5 図

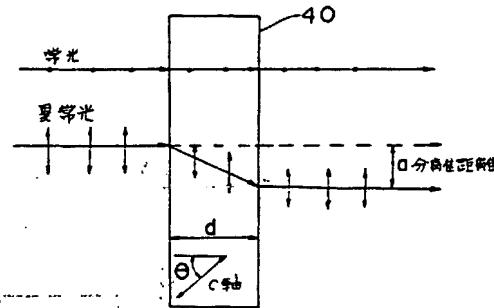




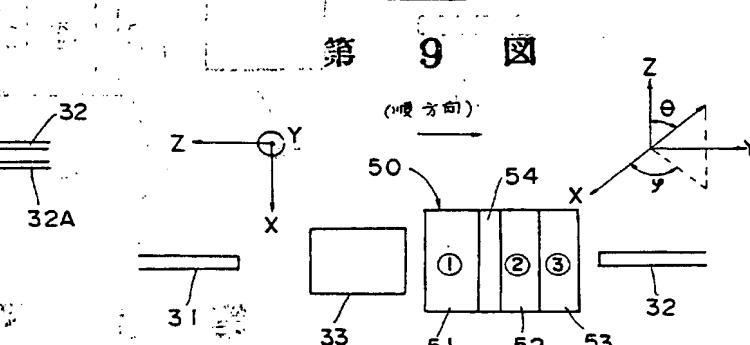
第 7 図



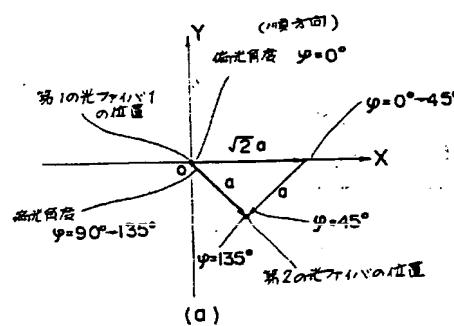
第 8 図



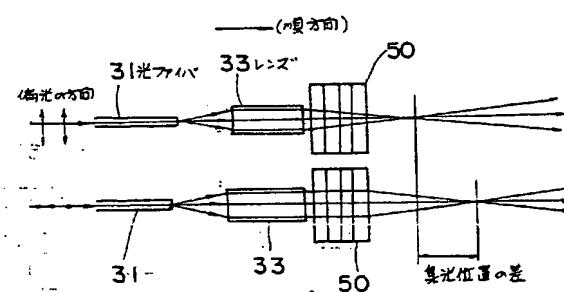
第 9 図



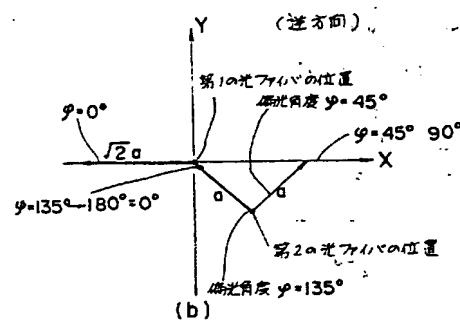
第 10 図



(a)

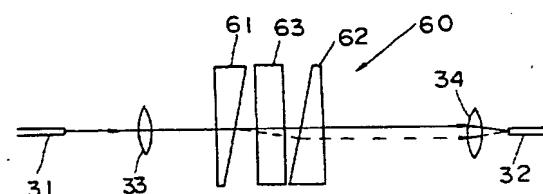


第 12 図



(b)

第 11 図



第 13 図

